

Artigo

Avaliação dos Parâmetros Hidrometeorológicos na Bacia do Rio Sorocaba/SP

Marcio Costa Abreu¹, Kelly Cristina Tonello²¹*Serviço Geológico do Brasil/CPRM, Goiânia, GO, Brasil.*²*Laboratório de Hidrologia em Ecossistemas Florestais, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, SP, Brasil.*

Recebido: 17 de Dezembro de 2015 – Aceito: 6 de Junho de 2016

Resumo

O entendimento do ciclo hidrológico auxilia no processo de planejamento dos recursos hídricos, em projetos de obras hidráulicas e estudos ambientais. Neste trabalho foi realizada a avaliação dos parâmetros hidrometeorológicos e a quantificação do volume de água em cada uma das principais fases do ciclo hidrológico, permitindo a proposição de um modelo de circulação da água na bacia hidrográfica do rio Sorocaba-SP. Os parâmetros foram estimados com base na equação do balanço hídrico, nos dados históricos de chuva, temperatura e vazão da rede hidrometeorológica existente e nas informações dos processos de outorga de concessão de uso dos recursos hídricos. Considerando-se que a vazão média anual no exutório da bacia acrescida da vazão consumida corresponde ao excedente hídrico do balanço, a diferença entre o valor estimado e o observado foi inferior a 10%. A vazão média anual no exutório da bacia somada a vazão consumida foi $63,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o que corresponde à 25% do volume de chuva anual média. O excedente hídrico estimado foi de $56,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a ETP $1.011 \text{ mm ano}^{-1}$ e a ETR 999 mm ano^{-1} , adotando-se uma CAD de 25 mm. Essas informações contribuem para o planejamento do uso dos recursos hídricos na bacia.

Palavras-chave: gestão de recursos hídricos; hidrologia; balanço hídrico.

Evaluation of the Hydrometeorological Parameters on Sorocaba River Watershed - SP

Abstract

Understanding the water cycle assists in the planning process of water resources, in projects of hydraulic works and environmental studies. This work was performed the evaluation of hydrometeorological parameters and the quantification of water flow in each of the major phases of the hydrological cycle, allowing the proposal of a circulation model of the water on Sorocaba river watershed-SP. The parameters were estimated by water balance equation, the historical datas of rainfall, temperature and flow of hydrometeorological network and information in the process of use concession of the water resources. Considering that the average annual flow in the river mouth more flow of consumed water corresponds to the sheet surplus, the difference between results estimated and observed was less than 10%. The average annual flow in the watershed more consumed flow was $63.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, which corresponds to 25% of the average annual rainfall volume. Estimated water surplus was $56.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ETP $1,011 \text{ mm year}^{-1}$ and ETR 999 mm year^{-1} . This information contributes to planning the use of water resources in the watershed.

Keywords: water resources management; hydrology; water balance.

1. Introdução

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas surge da necessidade de se compreender o funcionamento do ciclo da água, os processos que controlam o seu movimento e os prováveis impactos sobre

a quantidade e qualidade da água (Andrade *et al.*, 2013). O entendimento do ciclo hidrológico auxilia no processo de planejamento e manejo dos recursos hídricos, em estudos ambientais e projetos de obras hidráulicas (Marinho Filho *et al.*, 2012).

Essa avaliação pode ser realizada aplicando-se a equação geral do balanço hídrico, a qual corresponde à tradução matemática do ciclo hidrológico e se baseia no princípio da lei da continuidade e na troca de energia dos sistemas envolvidos, representando a quantificação da água presente nas suas diferentes fases, no tempo e no espaço (Tucci e Beltrame, 2007).

Os principais componentes do balanço hídrico (e consequentemente do ciclo hidrológico) são a evaporação, a precipitação, a transpiração das plantas e a percolação, infiltração e a drenagem (Tundisi, 2003). Cruz e Rivera (2014) destacam ainda que o consumo de água dos diferentes setores usuários também deve estar contido no balanço hídrico.

A bacia hidrográfica é o espaço geográfico mais adequado para a aplicação da equação do balanço hídrico (Porto e Porto, 2008). A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evapotranspirados e os infiltrados profundamente (Silveira, 2007).

Ainda, como destacam Porto e Porto (2008), na bacia hidrográfica se desenvolvem todas as atividades humanas, podendo se assumir que, no seu exutório, estão representados todos os processos que fazem parte do seu sistema, sendo consequência das formas de ocupação do território e da utilização das águas que para ali convergem.

Dessa maneira, através da aplicação da equação do balanço hídrico é possível estimar e avaliar os parâmetros

hidrológicos de uma determinada bacia, incluindo sua variabilidade temporal e espacial (Guandique e Moraes, 2015).

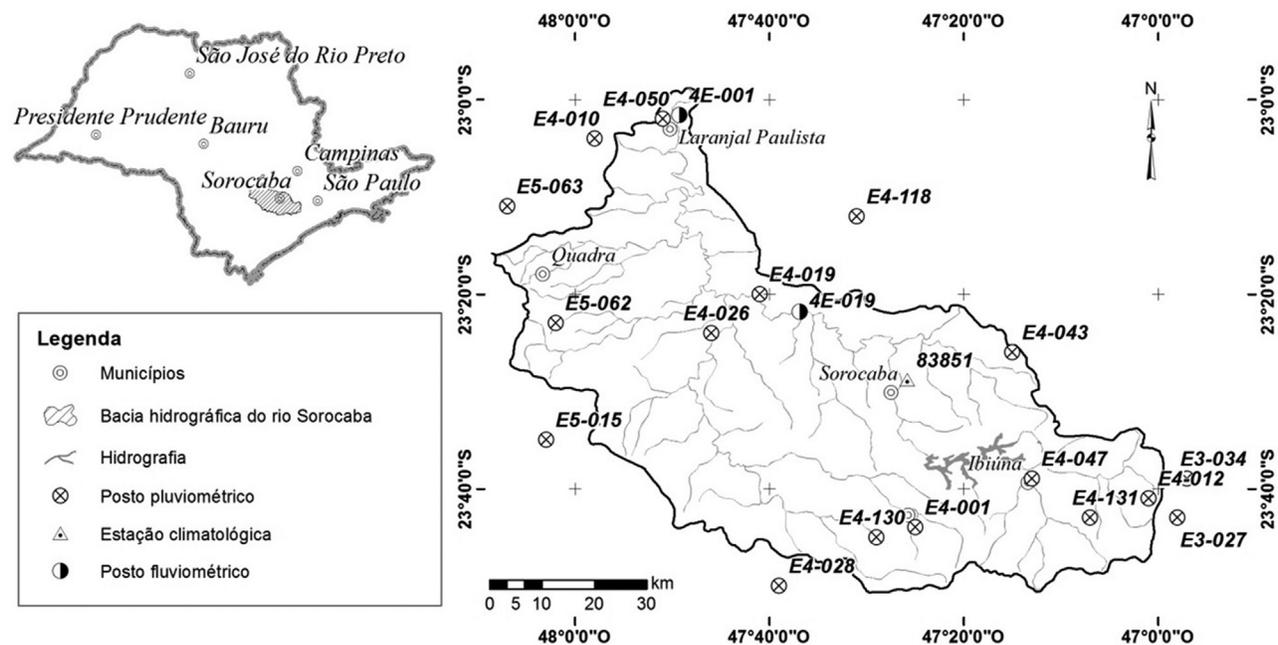
Neste estudo é realizada uma avaliação dos parâmetros hidrológicos da bacia do rio Sorocaba (BHS). Essa bacia está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos número 10 (UGRHI 10), conforme legislação do Estado de São Paulo (São Paulo, 1994).

O objetivo é contribuir para o entendimento da circulação da água na BHS, fornecendo informações para um melhor planejamento e uso racional dos recursos hídricos na bacia.

Para isso foram avaliados os dados disponíveis de chuva, temperatura e vazão do rio Sorocaba e estimados os parâmetros evapotranspiração real e potencial, o excedente hídrico, a deficiência hídrica, através do método do balanço hídrico, e as vazões derivada e de retorno para os principais usos consuntivos. Também foi analisada a variação dos parâmetros hidrometeorológicos ao longo do tempo e do espaço, permitindo uma discussão acerca dessa variabilidade que influencia na estratégia de gerenciamento.

2. Materiais e Métodos

A BHS está localizada no centro-sudeste do Estado de São Paulo (Fig. 1), com uma área de 5.273 km² (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2006) e abrangência de 28 municípios, dos quais 20 possuem sede em seu território. O rio Sorocaba, com aproximadamente 230 km, é o maior afluente da margem esquerda do rio Tietê, sendo formado pelos ribeirões Sorocamirim e Sorocabuçu, com foz no muni-



Fonte da base cartográfica: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2014

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Sorocaba/SP e distribuição espacial dos postos pluviométricos, fluiométricos e da estação climatológica.

cípio de Laranjal Paulista. Seus principais afluentes são os rios Sarapuí, Tatuí e da Onça e os ribeirões Aleluia e Guarapó. A represa de Itupararanga, localizada no alto curso do rio Sorocaba, próximo à cabeceira, é o principal reservatório da bacia (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba-Médio Tietê, 2013).

A consulta às estações climatológicas, postos pluviométricos e fluviométricos foi realizada no sítio eletrônico do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2015), no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas – ANA (2015a) e no Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE (São Paulo, 2015a). Foram utilizados os dados mensais de uma estação climatológica, 18 postos pluviométricos e dois postos fluviométricos (Fig. 1) para o período comum de 2006 a 2012, por conter o maior número de registros contínuos.

O posto fluviométrico analisado foi o denominado de Entre Rios (código 4E-001) situado próximo ao exutório da bacia do rio Sorocaba, no município de Laranjal Paulista. Sua área de contribuição é de 5.210 km², o que corresponde a 99% da área da bacia (5.273 km²).

A falha no registro mensal de vazão no posto fluviométrico 4E-001 foi preenchida pelo método da regressão linear simples. Foram utilizados como referência os dados do posto fluviométrico de prefixo 4E-019, com área de contribuição de 2.010 km², localizado no mesmo rio, na cidade de Iperó, disponível no banco de dados do DAEE (São Paulo, 2015a). O ajuste da reta foi realizado pelo método dos mínimos quadrados (Naghetini e Pinto, 2007).

As lacunas observadas nos registros de chuvas (Tabela 1) foram preenchidas pelo método de ponderação regional, usualmente utilizada para o preenchimento de séries mensais ou anuais de precipitações, visando à homogeneização do período de informações e à análise estatística das precipitações (Bertoni e Tucci, 2007).

A análise da consistência dos dados após o preenchimento das séries foi feita a partir do método da Dupla Massa desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados

Unidos. Esse método consiste em plotar em um gráfico cartesiano os valores acumulados mensais de um determinado posto nas ordenadas (eixo y) e de outro posto adotado como base de comparação nas abcissas (Bertoni e Tucci, 2007).

Para os dados de chuvas os valores base de comparação utilizados foram as médias mensais de todos os postos selecionados, exceto aquele que se quer consistir.

Haverá consistência dos dados da estação analisada quando houver uma tendência linear em relação às estações vizinhas. Para se verificar a linearidade entre os registros do posto analisado com relação aos demais avaliou-se o ajuste da equação da reta e do coeficiente de determinação. A homogeneidade regional dos dados ocorre quando o coeficiente de determinação for próximo a 1 (Buriol *et al.*, 2006).

A temperatura média mensal foi calculada através da média aritmética dos dados da estação climatológica de Sorocaba (83851). A precipitação média mensal e anual para a bacia foi estimada a partir da metodologia do polígono de Thiessen, conforme descrito em Bertoni e Tucci (2007).

A partir dos dados da série histórica foi elaborado o mapa de chuva média acumulada anual para a BHS, através da interpolação das médias anuais dos postos pluviométricos. Como os trabalhos desenvolvidos até o momento não demonstram de forma conclusiva qual o melhor método de interpolação espacial a ser aplicado para essa variável climática (Viola *et al.*, 2010; Mazzini e Schettini, 2009), foi utilizado o método de interpolação por *krigagem* ordinária, o qual é amplamente utilizado e apresentou bons resultados nos trabalhos de Loureiro e Lisboa (2014), Mello *et al.* (2003) e Carvalho e Assad (2002).

Para definição do ajuste do semivariograma foram utilizados três modelos teóricos: esférico, exponencial e gaussiano (Isaaks e Srivastava, 1989). A definição do melhor ajuste do modelo foi obtida por meio da técnica de validação cruzada (Isaaks e Srivastava, 1989), onde o valor

Tabela 1 - Número de lacunas nos registros das séries históricas (2006 a 2012) dos instrumentos avaliados neste estudo.

Prefixo	Tipo	Município	Meses sem dados	Prefixo	Tipo	Município	Meses sem dados
E3-027	PP	Cotia	2	E4-050	PP	Laranjal Paulista	0
E3-034	PP	Cotia	0	E4-116	PP	Ibiúna	2
E4-001	PP	Piedade	9	E4-118	PP	Porto Feliz	0
E4-010	PP	Pereiras	2	E4-130	PP	Piedade	0
E4-012	PP	Cotia	0	E4-131	PP	Ibiúna	0
E4-019	PP	Iperó	0	E5-015	PP	Itapetininga	0
E4-026	PP	Tatuí	3	E5-062	PP	Tatuí	1
E4-028	PP	Pilar do Sul	0	E5-063	PP	Porangaba	0
E4-043	PP	Mairinque	10	83851	EC	Sorocaba	0
E4-047	PP	Ibiúna	1	4E-001	PF	Laranjal Paulista	1

PP: posto pluviométrico; EC: estação climatológica; PF: posto fluviométrico.

da chuva média histórica de uma estação pluviométrica é sequencialmente omitido e o seu valor previsto com os valores das estações restantes, permitindo um diagnóstico estatístico entre os valores previstos e os observados. Os parâmetros analisados foram o erro médio, erro quadrático médio, erro padrão médio, erro normalizado médio e o erro quadrático normalizado médio.

Com a obtenção dos parâmetros desses modelos determinou-se o Índice de Dependência Espacial (IDE) do fenômeno regionalizado em questão a partir da Eq. (1), proposta por Cambardella *et al.* (1994):

$$IDE = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \times 100\% \quad (1)$$

Sendo C_0 o efeito pepita; C_1 o patamar.

A partir da elaboração do balanço hídrico pela metodologia desenvolvida por Thornthwaite e Mather (1955), adaptado conforme simplificações propostas por Pereira (2005), com periodicidade mensal, foram estimados: a evapotranspiração potencial e a real, a deficiência hídrica e o excedente hídrico. A equação do balanço hídrico (Eq. (2)) é dada por:

$$P = ESC + \Delta ARM + ETR + I + R \quad (2)$$

onde P é a chuva (mm), ESC o escoamento superficial (mm), ETR a evapotranspiração real (mm), ΔARM a variação no armazenamento de água no solo (mm), I é a infiltração ou recarga (mm) e R as derivações de água da bacia (mm).

O escoamento superficial (ESC) e a infiltração (I) correspondem ao excedente hídrico e não foram desmembrados nesse estudo. O armazenamento (ARM) foi calculado com base nas simplificações propostas por Pereira (2005). A inicialização do balanço hídrico foi aplicada ao último mês do período chuvoso e seguiu o critério recomendado por Mendonça (1958).

A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada através do método proposto por Thornthwaite (1948), o qual apresenta bons resultados para a escala mensal (Pereira *et al.*, 2002). A evapotranspiração real (ETR) foi obtida a partir da Eq. (3) e da Eq. (4) baseadas nas considerações de Amorim Neto (1989):

$$ETR = ETP \text{ (se } P - ESC - ETP - I > 0) \quad (3)$$

$$ETR = P - ESC - \Delta ARM \text{ (se } P - ESC - ETP - I < 0) \quad (4)$$

A capacidade de água disponível no solo (CAD) depende da densidade aparente, da profundidade do perfil explorado pelas raízes da vegetação e da umidade na capacidade de campo até o ponto de murcha permanente (Pereira *et al.*, 1997). Devido à dificuldade em se definir um valor para essa variável, optou-se pelo uso de diferentes valores (25 mm, 50 mm, 75 mm e 100 mm), analisando-se os efeitos sobre os resultados do balanço hídrico e qual se

adequa melhor ao modelo proposto através da comparação do resultado do excedente hídrico com a vazão média anual no exutório da bacia.

As estimativas das vazões de retirada e de retorno dos principais usos consuntivos foram realizadas a partir dos dados dos processos de outorga disponibilizados em meio eletrônico pelo DAEE (São Paulo, 2015b). As vazões de retirada correspondem ao volume de água derivado dos mananciais pelos usuários, enquanto que a vazão de retorno é a parcela não consumida da vazão de retirada, ou seja, que retorna ao manancial. Os usos consuntivos foram agrupados em urbano, rural, dessedentação animal, industrial e irrigação, conforme definidos na Portaria DAEE nº 717/96 (São Paulo, 1996).

A estimativa da vazão de água derivada para cada uma das classes indicadas acima foi obtida com base na vazão outorgada e no regime de operação das captações, ambos descritos nos processos de outorga de concessão de uso dos recursos hídricos, conforme metodologia aplicada por ANA (2012) e pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos - SEMARH (Rio Grande do Norte, 2012a e 2012b).

Inicialmente foi realizada uma consistência do banco de dados, eliminando-se as outorgas indeferidas e os processos em duplicata. Os processos sem informação de vazão outorgada não foram utilizados nessa estimativa, enquanto que as lacunas existentes nas informações sobre regime de operação do sistema foram preenchidas com os dados da Tabela 2, que correspondem às médias dos registros que possuem a informação. As taxas de retorno adotadas para cada uma das classes de uso são aquelas descritas na Tabela 2.

Com os dados consistidos e as lacunas preenchidas foram calculados os volumes anuais de retirada multiplicando-se os dados do regime de operação (horas.dia^{-1} , dias.mês^{-1} e meses.ano^{-1}). Após esse cálculo, foram somados os volumes para cada uma das classes de uso, correspondendo ao volume total anual dessas classes. O volume de retorno corresponde ao volume anual retirado vezes a taxa de retorno aplicada para cada classe de uso.

Tabela 2 - Dados médios de operação dos processos outorgados e taxa de retorno.

Uso	Horas/dia	Dias/mês	Meses/ano	K_{ret}
Urbano	13	30	12	0,80 ¹
Rural	10	30	12	0,50 ²
Dessedentação animal	16	30	12	0,20 ²
Industrial	13	28	12	0,20 ³
Irrigação	7	21	12	0,34 ³

K_{ret} : taxa de retorno; 1: conforme recomendado pela NBR 9649 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986); 2: indicado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (2005); 3: estimado por ANA (2015b).

3. Resultados e Discussões

Nos resultados do teste de dupla massa observou-se que todos os instrumentos avaliados apresentaram consistência das séries históricas com comportamento linear e coeficientes de determinação superiores a 0,9944, o que garante a homogeneidade regional dos dados de chuvas utilizados nesse estudo.

A temperatura média anual na BHS para a série histórica avaliada (2006 a 2012) é de 21,2 °C com a menor temperatura média mensal ocorrendo em junho (17,1 °C) e a maior no mês de fevereiro (24,6 °C). Os meses mais frios ocorrem entre maio e agosto, onde a temperatura média mensal não ultrapassa 20 °C.

Analisando-se os dados de chuvas de cada posto pluviométrico, observa-se que os anos de 2008 e 2011 foram os que apresentaram os menores volumes anuais, abaixo da média da bacia, enquanto que no ano de 2009 ocorreram os maiores acumulados, superando a média da bacia (Fig. 2). Considerando-se os dados de todos os postos pluviométricos, o ano de 2009 apresentou chuva média anual de 1.759 mm, enquanto que nos anos de 2008 e 2011 foram, respectivamente, 1.244 mm e 1.199 mm.

Os traçados dos polígonos de Thiessen obtidos a partir dos postos pluviométricos e da estação climatológica e os respectivos coeficientes podem ser observados na Fig. 3. A chuva média anual na bacia, para o período entre 2006 e 2012, foi estimada em 1.339 mm.

Em relação aos dados médios de chuvas (Fig. 4), observa-se uma variação temporal ao longo do ano hidro-

lógico, com concentração no período entre outubro e março, onde a média mensal é superior a 100 mm e corresponde a mais de 70% do total anual. Nos demais meses ocorre diminuição do volume de chuvas, com o menor volume médio em agosto (29,5 mm).

Entre os modelos de semivariograma testados (Tabela 3), o gaussiano foi o que apresentou o melhor ajuste, contemplando-se todos os erros do prognóstico de maneira integrada, conforme recomendado por Lélis e Barroso (2011).

Através da análise do modelo teórico foi possível determinar os valores dos parâmetros aplicados na krigagem ordinária pelo método gaussiano, adotando-se 42,45 km para o maior alcance, para o efeito pepita 4.246 e patamar de 6.890. O modelo gaussiano apresenta IDE de 62% o que demonstra uma moderada dependência espacial, segundo Cambardella *et al.* (1994). O erro padrão médio corresponde a menos de 10% das médias anuais de chuvas observadas nos instrumentos avaliados, não comprometendo o resultado obtido pela interpolação.

A distribuição areal da chuva acumulada anual aponta a diminuição dos volumes da cabeceira, onde atinge valores próximos a 1.500 mm, em direção ao exutório da bacia, com lâmina acumulada de 1.220 mm, ou seja, uma redução de aproximadamente 20% (Fig. 5). Esta é uma informação importante para a gestão dos recursos hídricos na bacia, pois, considerando-se os trabalhos de Hewlett e Hibbert (1963) e de Weyman (1970), que indicam que a infiltração das águas das chuvas no solo ocorre principalmente nas

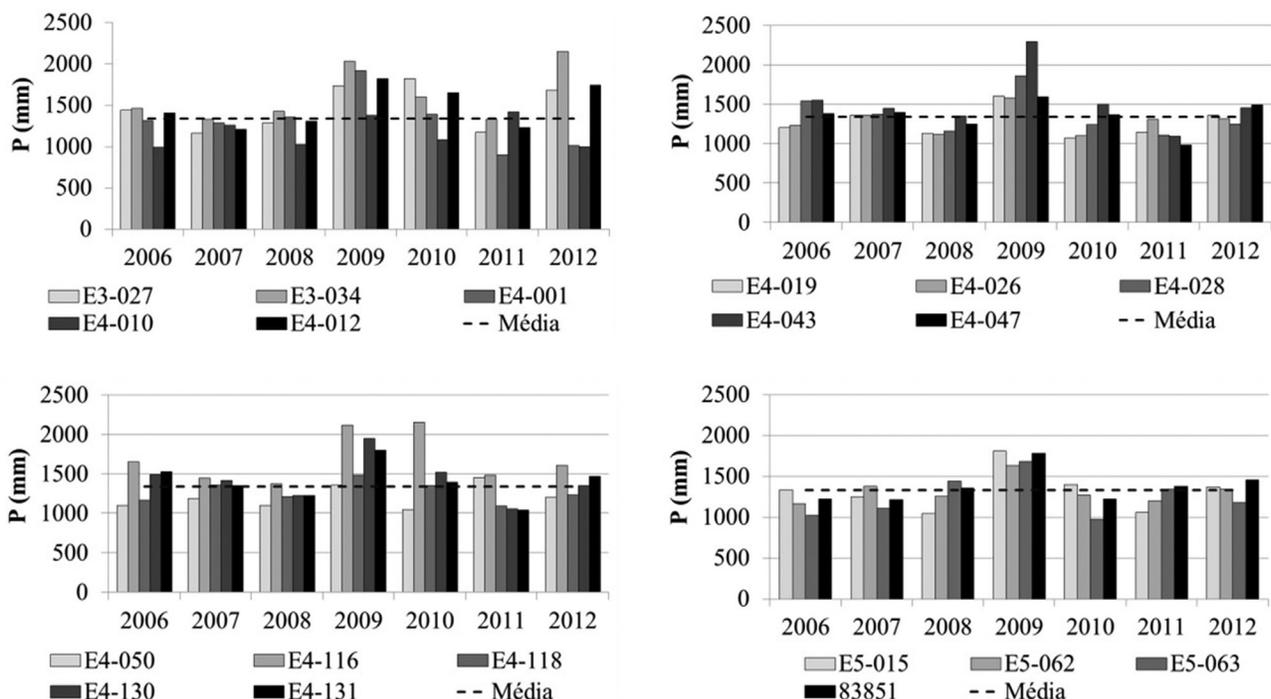


Figura 2 - Volumes de chuva anual nos postos pluviométricos em relação à média anual da BHS.

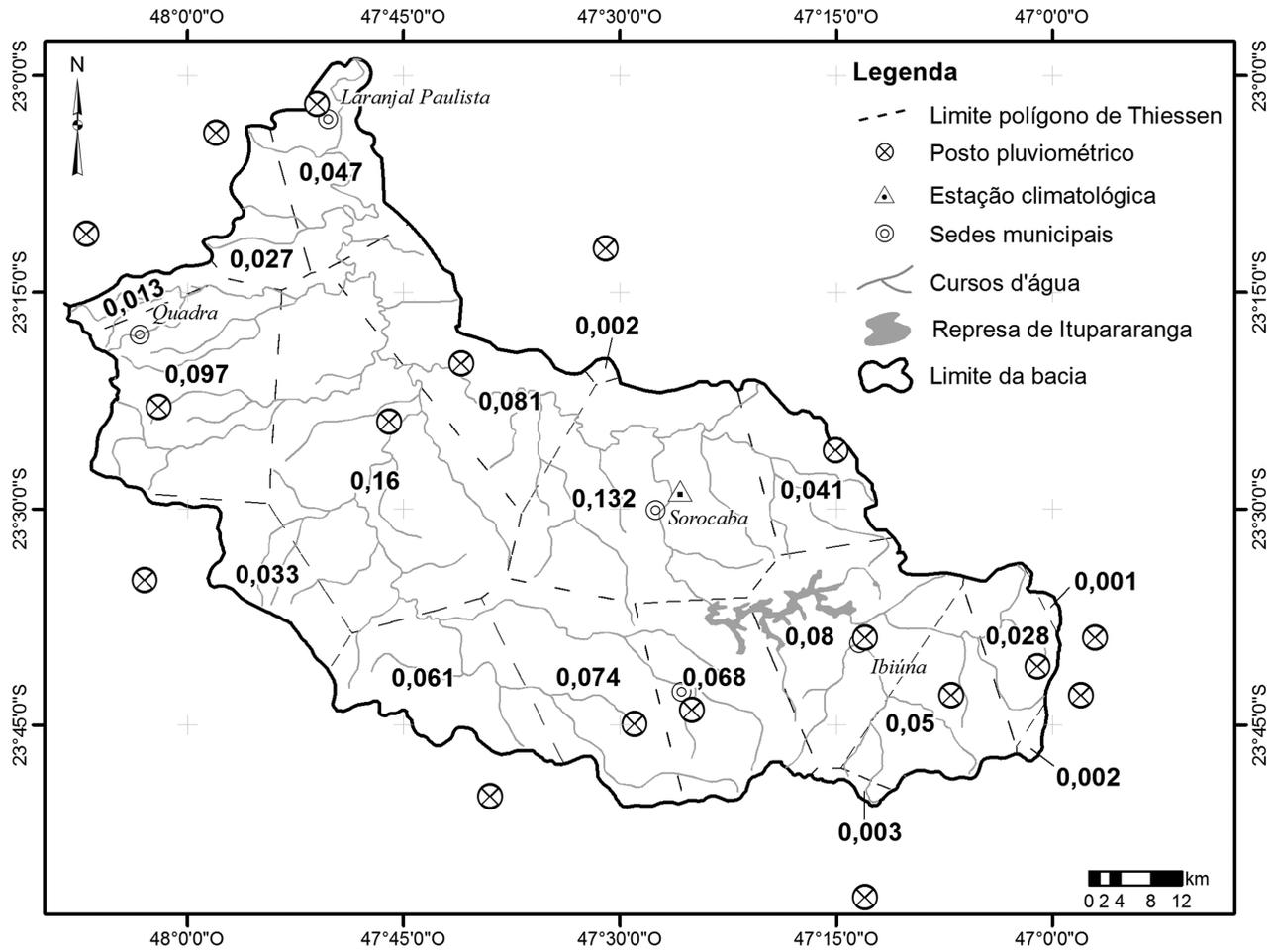


Figura 3 - Contorno dos polígonos de Thiessen e seus coeficientes.

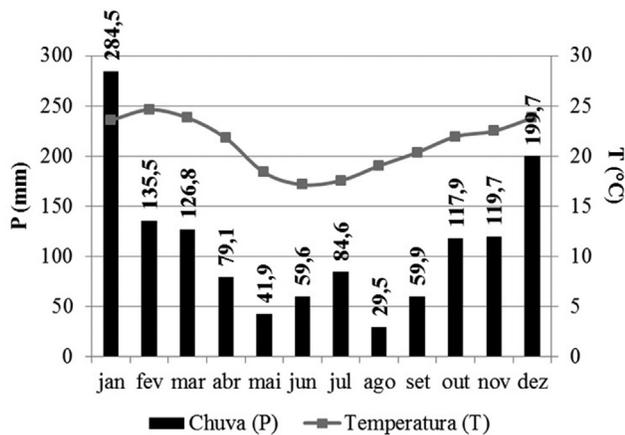


Figura 4 - Distribuição temporal da chuva média mensal (mm) e temperatura média mensal (°C) na BHS (período de 2006 a 2012).

partes altas das bacias e, com o aumento do teor da umidade no perfil de solo, desloca-se no sentido da vertente, gerando o escoamento subsuperficial, as cabeceiras são áreas fundamentais para a recarga hídrica do solo. Além disso, o maior

Tabela 3 - Acurácia dos modelos teóricos de semivariograma (mm).

Parâmetros	Modelos		
	Esférico	exponencial	Gaussiano
Erro médio	-10,018	-8,855	-9,845
Erro quadrático médio	96,396	97,094	95,835
Erro padrão médio	-0,065	-0,058	-0,063
Erro quadrático normalizado médio	0,967	0,972	0,967
Erro padrão médio	95,175	97,047	94,294

reservatório de água da BHS, a represa de Itupararanga, está localizado na porção da bacia com maior concentração de chuvas.

Os resultados do balanço hídrico climatológico conforme a Capacidade de Água Disponível no Solo - CAD adotada são apresentados na Tabela 4. A evapotranspiração potencial anual (ETP) foi estimada em 1.011 mm, com o maior valor mensal observado em dezembro (120 mm) e o menor em junho (43 mm).

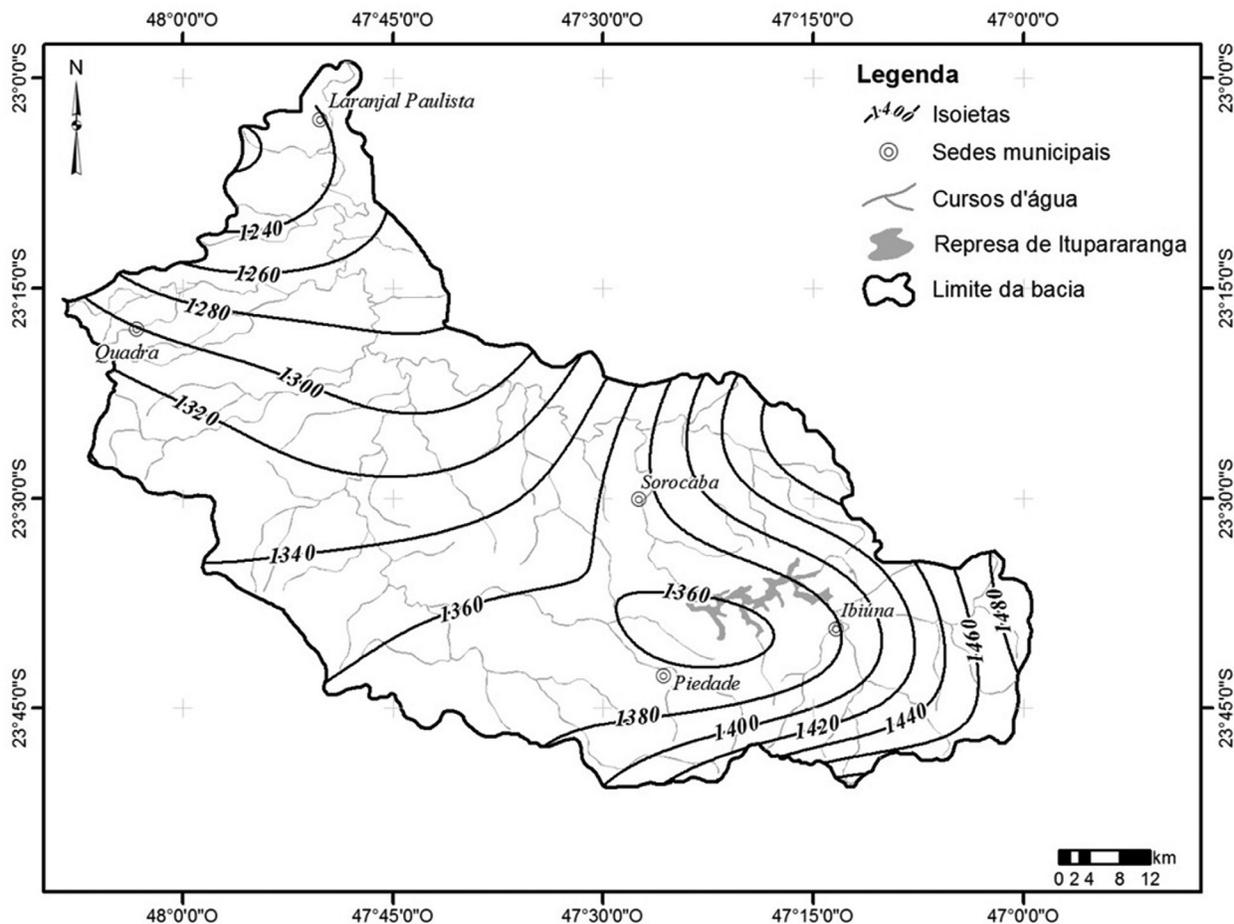


Figura 5 - Precipitação média anual na bacia hidrográfica do rio Sorocaba – SP.

Tabela 4 - Resultados do balanço hídrico climatológico (2006 a 2012).

	P	ETP	CAD 25 mm			CAD 50 mm			CAD 75 mm			CAD 100 mm		
			ETR	EXC	DEF	ETR	EXC	DEF	ETR	EXC	DEF	ETR	EXC	DEF
(mm)														
jan	284	118	118	166	0	118	166	0	118	166	0	118	166	0
fev	136	115	115	20	0	115	20	0	115	20	0	115	20	0
mar	127	113	113	14	0	113	14	0	113	14	0	113	14	0
abr	79	83	83	0	0	83	0	0	83	0	0	83	0	0
mai	42	54	54	0	0	54	0	0	54	0	0	54	0	0
jun	60	43	43	0	0	43	0	0	43	0	0	43	0	0
jul	84	46	46	38	0	46	38	0	46	38	0	46	38	0
ago	29	58	46	0	-11	51	0	-7	53	0	-5	54	0	-4
set	60	70	70	0	0	70	0	0	70	0	0	70	0	0
out	118	91	91	0	0	91	0	0	91	0	0	91	0	0
nov	120	98	98	21	0	98	16	0	98	14	0	98	13	0
dez	199	120	120	79	0	120	79	0	120	79	0	120	79	0
anual	1.337	1.011	999	338	-12	1.004	333	-7	1.006	331	-5	1.007	330	-4

P: chuvas (mm); ETP: evapotranspiração potencial (mm); CAD: capacidade de água disponível (mm); ETR: evapotranspiração real (mm); EXC: excedente hídrico (mm); DEF: deficiência hídrica (mm).

A evapotranspiração real (ETR) anual variou entre 999 mm para CAD de 25 mm e 1.007 mm, para CAD de 100 mm. Nota-se que a diferença anual entre a ETR e a ETP é relativamente pequena, independente da CAD adotada. Em todos os casos apenas no mês de agosto a ETP é maior que a ETR e ocorre deficiência hídrica.

O excedente hídrico (EXC) variou 2% entre o valor máximo de 338 mm ano⁻¹ e o mínimo de 330 mm ano⁻¹, o que em ambos os casos corresponde a cerca de 25% da precipitação anual. Estudos realizados por Horikosh e Fisch (2007) também determinaram a mesma proporção para o EXC em relação às chuvas na bacia hidrográfica do rio Una, no município de Taubaté, no Estado de São Paulo.

Analisando-se mensalmente os dados, o período entre novembro e março apresenta excedente hídrico, com valor máximo em janeiro (166 mm). Julho também apresentou excedência hídrica, apesar de corresponder ao período de estiagem na bacia. Este resultado pode ter sido influenciado pelo curto período da série histórica analisada, com a ocorrência de anos com volume de chuvas significativo nos meses menos chuvosos, principalmente junho e julho, conforme pode ser observado na Fig. 4. Assim, essas chuvas contribuíram para elevação da média mensal de julho, resultando em um excedente hídrico para esse mês.

A vazão média anual no posto 4E-001 para a série histórica analisada foi de 60,2 m³ s⁻¹, muito próxima a obtida por Fernandes *et al.* (2010) nessa mesma estação, para o período de 1984 a 2008, de 63,1 m³ s⁻¹. A vazão máxima média anual foi de 98,4 m³ s⁻¹ e vazão mínima média anual 37,8 m³ s⁻¹. A maior vazão média ocorreu no ano de 2010 (74,6 m³ s⁻¹) e a menor foi registrada no ano de 2012 (48,2 m³ s⁻¹), conforme pode ser observado na Tabela 5.

O ano de 2009 foi o que apresentou o maior volume acumulado de chuvas e, conseqüentemente, a maior vazão média anual. Entretanto, o ano de 2012, que possui a menor vazão média anual não foi o ano de menor acumulado de chuva. Esse fato provavelmente está associado à variação

temporal das chuvas durante esse ano, com pequenos volumes nos meses de outubro e novembro e aumento considerável em dezembro, resultando em uma vazão média anual menor, mesmo com acumulado anual de chuva maior que no ano de 2011.

Observa-se uma relação direta entre as vazões e a chuva (Fig. 6(a)), pois as vazões mais elevadas foram registradas nos períodos chuvosos. A maior vazão média mensal observada foi de 225,5 m³ s⁻¹ em janeiro de 2010, e a menor vazão média mensal registrada foi de 20,2 m³ s⁻¹ em outubro de 2007.

A curva de permanência elaborada a partir dos dados médios diários (Fig. 6(b)) aponta que para o período de 2006 a 2012 em 95% do tempo (Q_{95%}) a vazão foi igual ou superior a 24,1 m³ s⁻¹. Esse valor pode ser utilizado como indicador da disponibilidade hídrica da bacia.

Estudos elaborados pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT (2008) obtiveram para a BHS, Q_{7,10} de 15,2 m³ s⁻¹ através da regionalização dos parâmetros hidrológicos, e de 11,9 m³ s⁻¹ a partir de dados de séries históricas com no mínimo 25 anos de registros dos postos fluviométricos inseridos na bacia. O Comitê de Bacia Hidrográfica Sorocaba-Médio Tietê - CBH-SMT (2013) aponta para Q_{95%} de 56,0 m³ s⁻¹ para toda a UGRHI 10. Com isso, a contribuição do rio Sorocaba para a Q_{95%} da UGRHI 10 corresponde a 43% do total.

A maior vazão derivada da bacia é para atendimento ao abastecimento urbano, seguida pelo uso industrial e irrigação (Tabela 6), em concordância com as características urbanas e industriais da bacia. A vazão total derivada dos mananciais foi estimada em 9,69 m³ s⁻¹ dos quais 6,04 m³ s⁻¹ retornam a bacia e 3,65 m³ s⁻¹ são efetivamente consumidos, refletindo na vazão do exutório da bacia. Entretanto, as demandas para irrigação provavelmente estão subestimadas, visto que a agricultura é uma atividade importante na bacia. Estudos conduzidos por IPT (2008) indicam demandas superiores a 7,00 m³ s⁻¹ na bacia para essa finalidade.

Tabela 5 - Dados de vazão média do posto fluviométrico 4E-001 em m³ s⁻¹.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
2006	87,0	95,9	71,8	85,6	38,3	33,0	41,4	25,6	29,6	30,3	30,7	58,9	52,4
2007	202,1	99,9	54,3	35,2	34,6	30,3	48,8	28,8	21,5	20,2	41,0	70,8	57,3
2008	71,7	121,4	76,3	69,0	70,7	52,1	31,7	42,0	27,6	38,3	37,1	29,6	55,6
2009	56,7	109,7	70,6	34,8	31,6	30,0	63,4	66,5	92,7	72,6	87,5	161,6	73,1
2010	225,5	170,5	94,7	96,5	55,1	40,3	39,9	32,3	24,5	26,1	28,3	62,0	74,6
2011	175,9	79,2	129,3	62,0	32,4	35,7	24,7	24,0	21,3	57,7	33,1	42,4	59,8
2012	78,6	71,3	36,2	26,0	35,5	87,5	57,3	33,0	28,8	27,9	30,2	66,0	48,2
Média	128,2	106,8	76,2	58,5	42,6	44,1	43,9	36,0	35,1	39,0	41,1	70,2	60,1
DP	70,3	32,8	29,7	27,3	14,7	20,6	13,7	14,7	25,6	19,1	20,9	42,8	10,1
Mínimo	56,7	71,3	36,2	26,0	31,6	30,0	24,7	24,0	21,3	20,2	28,3	29,6	48,2
Máximo	225,5	170,5	129,3	96,5	70,7	87,5	63,4	66,5	92,7	72,6	87,5	161,6	74,6

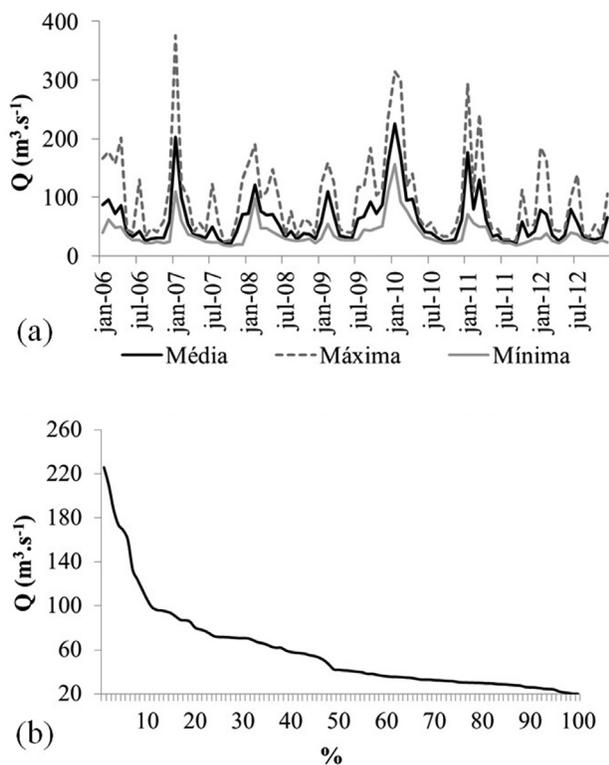


Figura 6 - (a) hidrograma e (b) curva de permanência dos dados do posto fluviométrico 4E-001 (2006 a 2012).

De acordo com o modelo teórico adotado, o excedente (EXC) estimado no balanço hídrico corresponde à vazão média observada no exutório da bacia acrescida da vazão consumida. Dessa maneira, foi possível comparar os resultados das estimativas do EXC para cada CAD utilizada, adotando-se aquele que mais se aproxima ao valor da soma da vazão média e da vazão consumida.

A soma da vazão média do rio Sorocaba e vazão consumida foi de 63,9 m³ s⁻¹ (382 mm ano⁻¹). Dos resultados do EXC o que mais se aproxima a esse valor foi aquele obtido com a CAD de 25 mm, cujo resultado foi

Tabela 7 - Parâmetros hidrometeorológicos da BHS estimados para o período de 2006 a 2012.

T _{med} (°C)	21	
	mm ano ⁻¹	m ³ s ⁻¹
P _{med}	1337	223,5
Q _{med}	360	60,2
ETP	1011	169
ETR	999	167
EXC	338	56,5
Q _{cons}	22	3,7

P_{med}: chuva média; T_{med}: temperatura média; Q_{med}: vazão média; ETP: evapotranspiração potencial; ETR: evapotranspiração real; EXC: excedente hídrico; Q_{cons}: vazão consumida.

56,5 m³ s⁻¹ (338 mm ano⁻¹). A diferença entre o valor observado e o estimado é de aproximadamente 10%. Sendo assim, foram adotados para a bacia os resultados dos parâmetros hidrometeorológicos obtidos no balanço hídrico realizado com CAD de 25 mm (Tabela 7).

4. Conclusões

Considerando-se os dados dos parâmetros hidrológicos para o período de 2006 a 2012 a chuva média na BHS foi de 1.339 mm ano⁻¹ e a temperatura média anual foi de 21,2 °C. O clima é caracterizado pela ocorrência de uma estação muito chuvosa e quente, entre outubro e março, quando se concentra mais de 70% do volume das chuvas, e outra pouco chuvosa e fria, nos demais meses do ano.

Verificou-se uma variabilidade anual no acumulado de chuvas nos instrumentos estudados em relação à média da bacia, com o ano de 2011 apresentando o menor valor médio (1.199 mm) e o ano de 2009 a maior média (1.759 mm). Também foi verificada uma variabilidade espacial da chuva, com diminuição dos volumes em torno de 20% da cabeceira em direção ao exutório da bacia.

A vazão média do rio Sorocaba próximo ao seu exutório para o período citado foi de 60,2 m³ s⁻¹ e a vazão consumida pelos usuários foi estimada em 3,7 m³ s⁻¹. Admitindo-se que o excedente corresponde à soma das duas

Tabela 6 - Vazões anuais de retiradas e de retorno pelos usos consuntivos na BHS segundo dados de outorga.

Usos consuntivos	Industrial	Urbano	Rural	Irrigação	Animal	Total
Vol _{deriv} (m ³)	57.560.057	203.245.560	7.686.868	35.601.772	1.410.127	305.504.384
Q _{deriv} (m ³ s ⁻¹)	1,83	6,44	0,24	1,13	0,04	9,69
Vol _{ret} (m ³)	11.512.011	162.596.448	3.843.434	12.104.602	282.025	190.338.521
Q _{ret} (m ³ s ⁻¹)	0,37	5,15	0,12	0,38	0,01	6,04
Vol _{cons} (m ³)	46.048.046	40.649.112	3.843.434	23.497.170	1.128.102	115.165.863
Q _{cons} (m ³ s ⁻¹)	1,46	1,29	0,12	0,75	0,03	3,65

Vol_{deriv}: volume derivado; Q_{deriv}: vazão derivada; Vol_{ret}: volume de retorno; Q_{ret}: vazão de retorno; Vol_{cons}: volume consumido que corresponde ao saldo da Vol_{deriv} - Vol_{ret}; Q_{cons}: vazão consumida que corresponde ao saldo da Q_{deriv} - Q_{ret}.

vazões citadas, o resultado do balanço hídrico que mais se aproximou desse valor foi de $56,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (338 mm ano^{-1}), adotando-se uma CAD de 25 mm. Sendo assim, o excedente hídrico da bacia corresponde à aproximadamente 25% do volume médio de chuva.

A ETR e a ETP anuais estimadas, para a CAD de 25 mm, foram respectivamente, 999 mm e 1.011 mm. O balanço hídrico indica ainda que apenas no mês de agosto ocorre deficiência hídrica.

Referências

- Agência Nacional de Águas. **Sistema de informações hidrológicas**: hidroweb. 2015a. Disponível em: www.hidroweb.ana.gov.br. Acesso em: 25 jun. 2015.
- _____. Conjuntura de recursos hídricos no Brasil: informe 2014. ANA, Brasília, 2015b.
- _____. Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Natal. ANA, Brasília, 2012. 5 volumes.
- Amorim Neto, M. S. A. Balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955). Petrolina: **EMBRAPA**, 1989.
- Andrade, M. A., Mello, C. R., Beskow, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. **ABNT**, Rio de Janeiro, 1986.
- Bertoni, J. C., Tucci, C. E. M. Precipitação. In: Tucci, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2007. p. 177-241.
- Buriol, G. A., Estefanel, V., Swarowsky, A., D'Avila, R. F. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 89-97, 2006.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T.B., Karlen, D. L., *et al.* Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- Carvalho, J. R. P., Assad, E. D. Comparação de interpoladores espaciais univariados para precipitação pluvial anual no Estado de São Paulo. Campinas: **Embrapa Informática Agropecuária**, 2002.
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba-Médio Tietê. Relatório de situação dos recursos hídricos. UGRHI 10. Ano base 2012. **CBH-SMT**, Sorocaba, 2013.
- Cruz, D. C., Rivera, M. E. Distribución del recursos hídrico de la microcuena La Quiña, Departamento de Boyacá, Colombia. **Revista Ambiental Agua, Ayre y Suelo**, [S.l.], v. 5, n. 1, p.1-19, 2014.
- Fernandes, A. M., Nolasco, M. B., Mortatti, J. Estimativa do escoamento superficial rápido e sua carga em suspensão com a aplicação do modelo de separação de hidrogramas com filtros numéricos: Bacia do Rio Sorocaba – SP. **Geociências**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 49-57, 2010.
- Guandique, M.E.G., Morais, L. C. Estudo de variáveis hidro-lógicas e do balanço hídrico em bacias hidrográficas. In: Pompêo, M., Moschini-Carlos, V., Nishimura P. Y., da Silva, S. C., Doval, J. C. L. (Org.). **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015. p. 434-447.
- Hewlett, J. D., Hibbert, A. R. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. **Journal Geophysical Resources**, [S.l.], v. 68, n. 4, p. 1081-1087, 1963.
- Horikosh, A. S.; Fisch, G. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 33-46, 2007.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências**. 2014. Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acesso em: 16 abr. 2014.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Plano de bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI 10): Revisão para atendimento da Deliberação CRH 62. **IPT**, São Paulo, 2008.
- _____. Plano de Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI 10). Relatório Técnico nº 91 265-205. **IPT**, São Paulo, 2006.
- Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa – BDMet**. 2015. Disponível em: www.inmet.gov.br. Acesso em: 23 jun. 2015.
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: **Oxford University Press**, 1989.
- Léllis, F. S., Barroso, G. F. Modelagem geoestatística da precipitação pluviométrica na bacia do rio Jacaraípe, Serra (ES). In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 15., 2011, Curitiba. Anais... Curitiba: [s.n.], 2011. p. 5201-5208.
- Loureiro, E., Lisboa, E.G. Comparação dos Métodos de Interpolação Espacial Aplicados a Dados Pluviométricos da Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 19., 2011, Maceió. Anais... Maceió: ABRH, 2011. p. 1-20.
- Naghettini, M., Pinto, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- Marinho Filho, G. M., Andrade, R. S., Zukowski Junior, J. C., Magalhães Filho, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.
- Mazzini, P. L. F., Schettini, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, Itajaí, v.1, n.13, p. 53-64. 2009.
- Mello, C. R., Lima, J. M., Silva, A. M., Mello, J. M., Oliveira, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003.
- Mendonça, P. V. Sobre o novo método de balanço hidrológico do solo de Thornthwaite-Mather. In: **Congresso Luso-Espanhol para o Progresso das Ciências**, 24., 1958, Madri. Anais... Madri: [s.n.], 1958. p. 271-282.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. Estimativas das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN. Relatório Final. Metodologia e resultados consolidados. **ONS**, [S.l.: s.n.], 2005.
- Pereira, A. R. Simplificando o Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.

- Pereira, A. R., Angelocci, L. R., Sentelhas, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002.
- Pereira, A. R., Vila Nova, N. A., Sedyama, G. C. **Evapo-(trans)piração**. Piracicaba: ESALQ, 1997.
- Porto, M. F. A., Porto, R. L. Gestão de Bacias Hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.
- Rio Grande do Norte (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas do litoral norte à Região Metropolitana de Natal (Bloco Litoral Norte). **Governo do Rio Grande do Norte**, Natal, 2012a. 2 volumes.
- _____. Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas do litoral sul à Região Metropolitana de Natal (Bloco Litoral Sul). **Governo do Rio Grande do Norte**, Natal, 2012b. 2 volumes.
- São Paulo (Estado). Lei Estadual n. 9.034, de 27 de dezembro de 1994. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH, a ser implantado no período 1994 e 1955, em conformidade com a Lei n. 7663, de 30 de dezembro de 1991, que instituiu normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, SP, 28 de dezembro de 1994, v. 104, n. 241. p. 3-5.
- São Paulo (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Rede hidrológica básica do Estado de São Paulo**. 2015a. Disponível em: www.dae.sp.gov.br. Acesso em: 23 jun. 2015.
- São Paulo (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Pesquisa de dados dos recursos hídricos do Estado de São Paulo**. 2015b. Disponível em: www.dae.sp.gov.br. Acesso em: 28 jun. 2015.
- _____. Portaria DAEE 717/96, de 12 de dezembro de 1996. Aprova a norma e os anexos de I a XVIII que disciplinam o uso dos recursos hídricos. **DAEE**, [S.l.: s.n.], 1996.
- Silveira, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: Tucci, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 2007. p. 35-51.
- Thorntwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- Thorntwaite, C. W., Mather, J. R. The water balance: publications in climatology. New Jersey: **Drexel Institute of Technology**, 1955.
- Tundisi, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 31-32, 2003.
- Tucci, C. E. M., Beltrame, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: Tucci, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2007. p. 253-287.
- Viola, M. R., Mello, C. R., Pinto, D. B. F., Mello, J. M., Ávila, L. F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.
- Weyman, D. R. Throughflow on hillslopes and its relation to the stream hydrograph. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v. 15, n. 3, p. 25-33, 1970.